

А. А. МИРОШНИК, М. М. СИВЕНКО

МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ «SMARTGRID»

Предложена усовершенствованная система электроснабжения, на базе технологии «SMARTGRID». Проанализированы путем моделирования несколько вариаций интеллектуальной двунаправленной системы электроснабжения в различных режимах работы. Полученные результаты после моделирования в среде Matlab / Simulink / SymPowerSystems были занесены в сравнительную таблицу. Так же были проведены расчеты максимального КПД и уровня уменьшения потерь сети электроснабжения путем использования силового фильтра и генерации энергии солнечными электростанциями. Это позволит увеличить количество солнечных электростанций и в целом долю возобновляемых источников энергии в общем производстве электроэнергии Украины.

Ключові слова: сеть электроснабжения, технология, smart grid, фотоэлектрические станции, энергетика, моделирование, модернизация, солнечные панели

О.О. МИРОШНИК, М. М. СИВЕНКО

МОДЕРНІЗАЦІЯ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕХНОЛОГІЇ «SMARTGRID»

Запропоновано удосконалену систему електропостачання, на базі технології «SMARTGRID». Проаналізовано шляхом моделювання кілька варіацій інтелектуальної двоспрямованої системи електропостачання в різних режимах роботи. Отримані результати після моделювання в середовищі Matlab / Simulink / SymPowerSystems були занесені в порівняльну таблицю. Так само були проведені розрахунки максимального ККД та рівня зменшення втрат мережі електропостачання шляхом використання силового фільтра і генерації енергії сонячними електростанціями. Це дозволить збільшити кількість сонячних електростанцій і в цілому частку поновлюваних джерел енергії в загальному виробництві електроенергії України.

Ключевые слова: сеть электроснабжения, технология, smart grid, фотоэлектрические станции, энергетика, моделирование, модернизация, солнечные панели

O. O. MIROSHNYK, M. M. SYVENKO

MODERNIZATION OF ELECTRICITY SUPPLY NETWORKS USING «SMARTGRID» TECHNOLOGY

An advanced power supply system based on SMARTGRID technology is proposed. Several variations of the intelligent bi-directional power supply system in different operating modes are analyzed by simulation. The results obtained after modeling in the Matlab / Simulink / SymPowerSystems environment were recorded in a comparative table. The calculations of the maximum efficiency and the level of reduction of losses of the power supply network by using a power filter and the generation of energy by solar power plants were also carried out. This will increase the number of solar power plants and the overall share of renewable energy in Ukraine's total electricity production.

Keywords: power supply network, technology, smart grid, photoelectric stations, energy, modeling, modernization, solar panels

Введение. Изменение концепции развития современной энергетики обусловлена растущим интересом к возобновляемым источникам энергии. Наиболее быстрыми темпами среди маломощных распределенных возобновляемых источников энергии развиваются солнечные фотоэлектрические станции, работающие как автономно, так и могут быть интегрированы в промышленной сети, установленная мощность которых колеблется в диапазоне от нескольких киловатт до ста мегаватт. Для солнечных электростанций в общем производстве электроэнергии Украины составляет около 1%, хотя в соответствии с обязательствами перед Европейским энергетическим сообществом до 2020 года должна достигать 7%.

Цель исследований. Опытный анализ интеллектуальной системы электроснабжения с двунаправленным энергетическим потоком «SmartGrid».

Основные материалы исследований. Функционирование системы электроснабжения SmartGrid обусловлено режимами работы

промышленной сети, возобновляемых источников энергии и переменным графиком нагрузки. Поэтому на перед проектной стадии следует промоделировать работу интеллектуальной системы электроснабжения в рабочих режимах.

Для определения ежедневной облученности необходимо учитывать угол установки солнечных модулей и определить среднемесячное поступление солнечного излучения в кВт·ч/месяц.

Склонение Солнца (угол между линией, соединяющей центры Земли и Солнца, и ее проекцией на плоскость экватора) в средний день месяца, град:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin(360 \cdot (284 + n) / 365) = 23.45 \cdot \sin(360 \cdot (284 + 228) / 365) = 22.10^\circ, \quad (1)$$

где n – порядковый номер дня, отсчитанный от 1 января (номер среднего расчетного дня для каждого месяца года).

Для остальных месяцев расчёт проводится аналогично и занесен в табл. 1, для наглядности данные

таблицы, с помощью программного обеспечения «MS Excel» перенесены на график (рис. 1).

Таблица 1 – Угол склонения Солнца по месяцам

МЕСЯЦ	ЯНВ	ФЕВ	МРТ	АПР	МАЙ	ИЮНЬ	ИЮЛЬ	АВГ	СЕНТ	ОКТ	НОЯ	ДЕК
δс, град	-21,27	-13,29	-2,82	9,41	18,79	23,31	21,52	13,78	2,22	-9,60	-19,00	-23,34

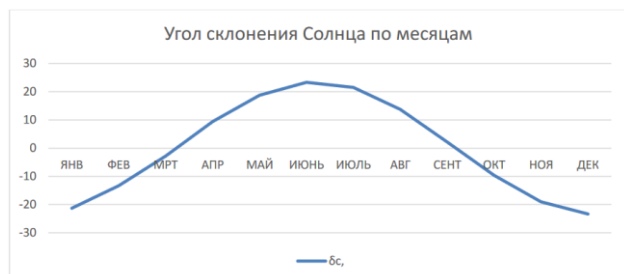


Рисунок 1 – Угол склонения Солнца по месяцам

Для обеспечения условий поглощения солнечной энергии солнечными панелями, его поглощающая поверхность должна быть ориентирована на юг с углом наклона $\beta_{\text{опт}}$, который будет равен:

$$\beta_{\text{опт}} = \varphi_p - \delta_c. \quad (2)$$

де φ_p – широта местности, где рассматривается проектирование ФЭС (табл. 2).

Таблица 2 – Оптимальный угол установки фотоэлементов

МЕСЯЦ	ЯНВ	ФЕВ	МРТ	АПР	МАЙ	ИЮНЬ	ИЮЛЬ	АВГ	СЕНТ	ОКТ	НОЯ	ДЕК
β _{опт.} , град	26,73	34,71	45,8	57,41	66,76	71,31	69,52	61,78	50,22	38,4	29	24,66

Согласно рис. 2 оптимальным углом наклона солнечных батарей составит 45 градусов, что показывает аппроксимация на графике.

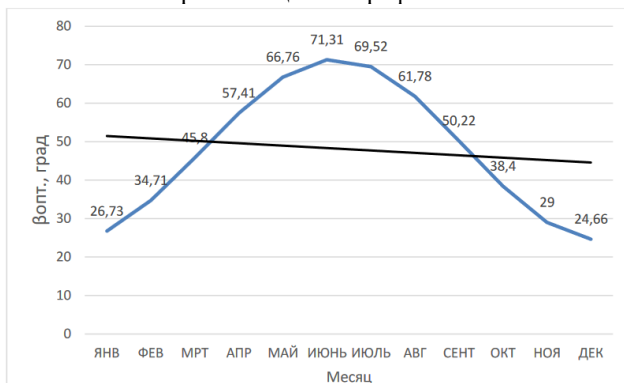


Рисунок 2 – Оптимальный угол установки фотоэлементов

В качестве объекта для моделирования рассмотрим локальную систему электроснабжения, которая представляет собой совокупность мелких домохозяйств, электроснабжение которых осуществляется от трансформаторной подстанции по магистральной схеме четырехжильным кабельной линией 0,4 кВ.

Отличительной особенностью такой традиционной системы электроснабжения является

однаправленность энергетического потока от сети к нагрузке. Установленная мощность нагрузок составляет может быть до 30 кВт. Предположим, что на некоторых домохозяйствах установлено распределены солнечные электростанции разной номинальной мощностью, подключаются по условиям «зеленого тарифа» для передачи избытка возобновляемой энергии к сети.

Модель состоит из трех блоков SolarStation, имитирующие распределены солнечные электростанции разной номинальной мощности, блока EnergyStorage, имитирующий системный накопитель, блоков Load, имитирующие линейные активно-реактивные и нелинейные нагрузки, и блоков PAF, имитирующие параллельные силовые активные фильтры.

Реализация SmartGrid осуществляется посредством установления специализированного силового оборудования, работа которого контролируется информационно-управляющей системе в соответствии с состоянием сети в текущий момент времени.

На равном удалении от распределенных солнечных электростанций устанавливается системный энергоемкий накопитель, который предназначен для решения двух ключевых задач – выполнение функции резервного источника питания в автономных режимах работы системы и выравнивания графика нагрузки, то есть устранения суточных пиков и провалов в энергопотреблении.

Реализация указанных функций совместно с установкой силовых активных фильтров позволит минимизировать потери в линии и элементах системы электроснабжения. Результаты выполненных расчетов показали, что в зависимости от параметров системы теоретически возможно уменьшение мощности потерь находится в диапазоне от 2 до 15%. Если уровень уменьшения потерь будет больше потери в оборудовании, устанавливается, то реализация указанных мероприятий является энергетически обоснованной. Сложившаяся сетевая структура позволяет отдельно реализовать систему электропитания постоянного тока.

Системный накопитель энергии заряжается от распределенных солнечных электростанций, а в случае полного заряда включаются сетевые инверторы и возобновляемые источники отдают энергию в сеть переменного тока. В автономном режиме, когда автоматический выключатель в начале питающей линии переменного тока разомкнут, с помощью автономного инвертора формируется синусоидальное напряжение частотой 50 Гц и электропитания нагрузок подключенных к SmartGrid осуществляется от системного энергоемкого накопителя. К автономной сети постоянного тока могут подключаться соответствующие маломощные нагрузки или электромобили, как для подзарядки бортовых аккумуляторов и в качестве дополнительных резервных источников.

Многообразие режимов работы SmartGrid обеспечивается дополнительным информационным уровнем, на котором собирается информация о состоянии

каждого элемента системы и в соответствии с приоритетными алгоритмами формируются управляющие воздействия, обрабатываются силовыми полупроводниковыми преобразователями.

После моделирования в среде Matlab / Simulink / SymPowerSystems были получены данные о работе сети и занесены в сравнительной таблице. 3, где приведены сопоставления энергетических характеристик SmartGrid в различных режимах работы при неизменном нагрузке и заряженного системного накопителя.

Модель солнечного фотомодуля в среде Matlab создан с использованием стандартных блоков SolarCell библиотеки SimElectronics, воспроизводящих детализированную математическую модель солнечного элемента, которая учитывает особенности его электрических и тепловых характеристик.

В Matlab-модели реализовано моно-кристаллический солнечный фотомодуль CHN200-72M с характеристиками: максимальная мощность - $P_m = 200$ Вт; количество элементов на модуль - $N = 72$; напряжение холостого хода $U_{oc} = 45$ В; ток короткого замыкания - $I_{sc} = 5,8$ А; напряжение в точке отбора максимальной мощности - $U_{mp} = 38,8$ В; ток в точке отбора максимальной мощности - $I_{mp} = 5,15$ А; максимальное напряжение системы постоянного тока - $U_{DCmax} = 1000$ В; температура при нормальных условиях - $NOCT = 45$ °C ± 2 °C; температурный коэффициент напряжения холостого хода - $K_{oc} = -0,34\%$ / °C; температурный коэффициент тока короткого замыкания - $K_{sc} = +0,66\%$ / °C; температурный коэффициент максимальной мощности - $K_{Pm} = -0,44\%$ / °C; КПД - 18,31%.

Таблица 3 - Сопоставление энергетических характеристик SmartGrid в различных режимах работы

Режим работы	Сеть без SG	Сеть з SG	Сеть с SG без ФЕС	Сеть с SG без САФ	Автономный без САФ
P_s , Вт	20271	5976	19301	7070	0
Q_s , Вт	13103	-34,5	25,7	15101	0
P_{ES} , Вт	0	0	0	0	25,032
Q_{ES} , ВАр	0	0	0	0	-12313
P_{LE} , Вт	15964	19964	16085	19882	23338
Q_{LE} , ВАр	13101	16365	13205	16299	19139
P_{st1} , Вт	0	9001	0	8990	0
P_{st2} , Вт	0	3789	0	3968	0
P_{st3} , Вт	0	1906	0	1907	0
ΔP , Вт	4307	707,4	3216	2054	1643
η	0,7875	0,9685	0,8334	0,9064	0,9343

Сопоставление данных таблицы предоставляет наглядное представление об уменьшении уровня потерь при введении SmartGrid. Резерв повышения КПД путем введения SmartGrid, имеет две составляющие, первая из которых связана с нормализацией режима электропотребления, а вторая - с оптимизацией структуры сети, когда сокращаются расстояния между источниками энергии и потребителями и уменьшается плотность сетевого энергетического потока и магистральной линии. Причем вторая составляющая вносит более существенный вклад в увеличение КПД системы электроснабжения. По принятым в модели параметрам участков питающей линии применения силового активного фильтра приводит к увеличению КПД практически на 4,6%, а перераспределение энергетических потоков, за счет генерации энергии солнечными электростанциями, приводит к увеличению КПД на 11,9%. Таким образом общесистемные потери в исследуемой SmartGrid уменьшаются в 6 раз, а КПД системы электроснабжения повышается на 16,5%, при снижении среднесуточного потребления электроэнергии от сети питания в летний период на 70%.

Выводы. 1. Моделированием в пакете Matlab локализованной системы электроснабжения с конкретными параметрами показало, что реализация концепции SmartGrid с использованием технической базы силовой электроники, энергоёмких накопителей, и возобновляемых источников энергии, например, распределённых солнечных электростанций, позволяет решить несколько ключевых задач: повысить надёжность электроснабжения; улучшить качественные показатели электроэнергии; минимизировать потери в элементах системы; реализовать гибкие режимы с выравниванием пиковых нагрузок; реализовать независимую систему электропитания постоянного тока; снизить расходы на оплату электроэнергии.

2. Полученные аналитические соотношения для расчета максимально возможного и реального КПД трехфазной трехпроводной сети с симметричными синусоидальными напряжениями источника в прямом, обратном и двунаправленный потоках, а также соотношение для определения максимального значения коэффициента возврата энергии. Проверка полученных соотношений показала, что соотношение для расчета максимально возможного КПД сети не дают погрешности, погрешность расчета реального КПД не превышает 1%.

3. КПД трехфазной трехпроводной сети с симметричными синусоидальными источниками напряжения в двунаправленный поток будет зависеть от коэффициента передачи энергии, коэффициента скорости передачи энергии, максимально возможного КПД в прямом однонаправленном потоке, коэффициентов дополнительных потерь в прямом и обратном потоках, определяются средне-квадратичными значениями реактивной мощности и мощности, обусловленной пульсациями мгновенной активной мощности.

4. Результаты компьютерного моделирования трехфазной трехпроводной сети с двунаправленным

потоком подтвердили тезис о том, что КПД такой системы может быть незначительным, даже при высоких значениях КПД, в отдельно взятых прямом и обратном потоках. Например, для сети с $k_{SC} = 50$ и коэффициенты возврата $k_E = 0.5$, максимально возможные КПД в прямом и обратном потоках $\eta_{\max} \rightarrow = 0.9796$, $\eta_{\max} \leftarrow = 0.9899$, а максимально возможный КПД в двунаправленном потоке $\eta_{\max \leftrightarrow} = 0.949$. Если в сети находятся дополнительные потери, то реальный КПД в двоспрямованому потоке будет еще ниже.

5. Резерв повышения КПД путем реализации SmartGrid, имеет две составляющие, первая из которых связана с нормализацией режима электропотребления, а вторая - с оптимизацией структуры сети, когда сокращаются расстояния между источниками энергии и потребителями и уменьшается плотность сетевого энергетического потока в магистральной линии. Причем вторая составляющая вносит более существенный вклад в увеличение КПД системы электроснабжения.

Список литературы

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01.10.14 № 902-р «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року».
2. Smolenski R. Conducted Electromagnetic Interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. – Springer-Verlag London, 2012. – 160 p.
3. Gow J.A. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies / J.A. Gow, C.D. Manning // IEEE Proceedings- Electric Power Applications. – 1999. – Vol. 146. – No. 2. – P. 193-199.
4. NIST Framework and Road map for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0 // Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2014. – 246 p.
5. Жемеров Г. Г. Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электроснабжения от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2015. – № 4. – С. 66–70.
6. Козюков Д. А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в Matlab/Simulink / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 112. – С. 1–16.
7. Артеменко, М. Ю. Аналіз можливості збільшення ККД трифазної чотирипровідної системи живлення засобами паралельної активної фільтрації / М. Ю. Артеменко, Батрак Л. М., Михальський В. М., Поліщук С. Й. // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. С. 12–18.
8. Артеменко, М. Ю. Потужність втрат трифазної чотирипровідної системи живлення / М. Ю. Артеменко, В. О. Лесик, С. Й. Поліщук // Електроніка та зв'язок. – 2016. – № 5. С. 25–30. – doi: 10.20535/2312-1807.2016.21.5.81925.
9. Жемеров Г. Г. Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Электротехника и электромеханика. – 2014. – № 1. – С. 45-57.
10. Жемеров Г. Г. КПД трехфазных систем электроснабжения с двунаправленным потоком энергии / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, И. В. Берчук, С. В. Котелевец // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – Вип. 26. – С. 34-38.

References (transliterated)

1. Rozporjadzhennja Kabinetu Ministriv Ukraïni vid 01.10.14 № 902-r «Pro Nacional'nij plan dij z vidnovljuvanoj energetiki na period do 2020 roku».[Ordinance of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 01.10.14 No. 902-p “On the National Renewable Energy Action Plan for the Period up to 2020”]
2. Smolenski R. Conducted Electromagnetic Interference (EMI) in Smart Grids / R. Smolenski. – Springer-Verlag London, 2012. – 160 p.
3. Gow J.A. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies / J.A. Gow, C.D. Manning // IEEE Proceedings- Electric Power Applications. – 1999. – Vol. 146. – No. 2. – P. 193-199.
4. NIST Framework and Road map for Smart Grid Interoperability Standards, Release 3.0 // Office of the National Coordinator for Smart Grid Interoperability, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2014. – 246 p.
5. Zhemerov G. G. Zavisimost' dopolnitel'nyh poter' v trehfaznyh sistemah jelektrosnabzhenija ot reaktivnoj moshhnosti i pul'sacij mgnovennoj aktivnoj moshhnosti [Dependence of additional losses in three-phase power supply systems on reactive power and ripple instantaneous active power] / G. G. Zhemerov, D. V. Tugaj // Tehnichna elektrodinamika. – Kiïv: IED NANU. – 2015. – № 4. – S. 66–70.
6. Kozjukov D. A. Modelirovanie karakteristik fotoelektricheskikh modulej v Matlab/Simulink [Modeling the characteristics of PV modules in Matlab / Simulink] / D. A. Kozjukov, B. K. Cygankov // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo sudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – № 112. – C. 1–16.
7. Artemenko, M. Ju. Analiz mozhlivosti zbil'shennja KKD trifaznoj chotiriprovodnoj sistemi zhivlennja zasobami paralel'noj aktivnoj fil'tracii [Analysis of the possibility of increasing the efficiency of a three-phase four-wire power supply by means of parallel active filtration] / M. Ju. Artemenko, Batrak L. M., Mihal's'kij V. M., Polishhuk S. J. // Tehnichna elektrodinamika. – 2015. – № 6. S. 12–18.
8. Artemenko, M. Ju. Potuzhnist' vtrat tryfaznoj chotyryprovodnoj systemy zhivlennja [Power loss of three-phase four-wire power system] / M. Ju. Artemenko, V. O. Lesyk, S. J. Polishhuk // Elektronika ta zv'jazok. – 2016. – № 5. S. 25–30. – doi: 10.20535/2312-1807.2016.21.5.81925.
9. Zhemerov G. G. Energyja y moshhnost' v systemah jelektrosnabzhenija s poluprovodnykovymy preobrazovatel'nyjamy y nakopytel'nyjamy energyy [Energy and power in power supply systems with semiconductor converters and energy storage] / G. G. Zhemerov, D. V. Tugaj // Elektrotehnika i elektromekhanika. – 2014. – № 1. – S. 45-57.
10. Zhemerov G. G. KPD trehfaznyh system jelektrosnabzhenija s dvunapravlenym potomkom energyy [Efficiency of three-phase power supply systems with a bi-directional energy descendant] / G. G. Zhemerov, D. V. Tugaj, Y. V. Berchuk, S. V. Kotelevic // Visnyk Nacional'nogo tehnicnogo universytetu «Harkiv's'kyj politehnicnyj instytut». – Harkiv: NTU «HPI». – 2018. – Vyp. 26. – S. 34-38

Надійшла (received) 15.11.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сивенко Михайло Максимович (Сивенко Михаил Максимович, Syvenko Mykhailo Maksymovych) – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, студент; м. Харків, Україна; michael.syvenko@gmail.com.

Мірошник Олександр Олександрович (Мирошник Александр Александрович, Miroshnyk Alexander Alexandrovych) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, м. Харків, Україна; omiroshnyk@ukr.net